

ارزیابی چرخه حیات باتری‌های لیتیوم یونی (مطالعه موردی: آندهای گرافیت و اکسید کبالت)

زهرا پاداش برمچی^۱، امیرحسین حمیدیان^{۲*}، نعمت‌اله خراسانی^۳، محمود کاظم‌زاد^۴

۱. دانشجوی دکتری محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۲. استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۳. استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۴. استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۷)

چکیده

این روزها به باتری‌های لیتیوم یونی به دلیل شدت انرژی بالاتر و آثار زیست‌محیطی کمتر نسبت به باتری‌های استفاده‌شده دیگر، بسیار توجه شده است. مواد استفاده‌شده در آند، یکی از بخش‌های مهم تأثیرگذار بر شدت انرژی و آثار زیست‌محیطی باتری‌ها هستند. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی اثرپذیری میزان انتشار آثار زیست‌محیطی ناشی از مواد مختلف استفاده‌شده در آند باتری‌های لیتیوم یونی با افزایش میزان انرژی تولیدی در واحد جرم ماده فعال و نیز چگونگی اثر بازیافت مواد بر میزان آثار زیست‌محیطی بالقوه ناشی از این باتری‌هاست. در این مطالعه میزان وزنی اولیه اجزای مورد نیاز برای سناریوهای مختلف براساس تجربیات آزمایشگاهی، منابع و گزارش‌های مستندشده تعیین شد. سپس براساس واحد عملکردی تعیین‌شده که در این مطالعه ۱۰۰۰ میلی‌آمپر ساعت انرژی تولیدی توسط ماده فعال آند باتری در نظر گرفته شده است، داده‌های وزنی اولیه نرمال شدند و پس از آن همه آثار زیست‌محیطی و مصرف انرژی مربوط به تمام اجزای تشکیل‌دهنده و استفاده‌شده در باتری شامل ماده فعال (همان ماده آند سنتزی)، مواد الکترولیت شامل LiPF_6 در حلال NMP، اتیلن کربنات، دی‌متیل کربنات و بایندر توسط داده‌های به‌دست‌آمده از مدل GREET2 سیاه‌نویسی شدند. پس از طبقه‌بندی، ویژگی‌سازی براساس فاکتورهای ویژگی‌سازی روش CML و درنهایت وزندهی آثار زیست‌محیطی مختلف براساس روش مدل‌سازی MET صورت گرفت. بررسی نتایج ارزیابی آثار زیست‌محیطی باتری‌های با آند گرافیت و اکسید کبالت نشان می‌دهد که باتری‌های با آند اکسید کبالت آثار گازهای گلخانه‌ای، گازهای اسیدی، مه‌دود فتوشیمیایی و مصرف انرژی بیشتری نسبت به باتری‌های با آند گرافیت دارند. در مقابل، آثار باتری‌های با آند اکسید کبالت در صورت بازیافت می‌تواند به شکل قابل توجهی کاهش یابد و در نتیجه می‌توان به باتری‌های کوچک‌تر با وزن کمتر و شدت انرژی بیشتر با آثار زیست‌محیطی کمتر دست یافت.

کلیدواژه‌گان: آندهای باتری، ارزیابی چرخه حیات، انرژی، باتری لیتیوم یونی، بازیافت.

۱. مقدمه

یکی از نگرانی‌های عمده زیست‌محیطی به‌ویژه در دستیابی به توسعه پایدار، انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) و سایر گازهای گلخانه‌ای است. گازهای گلخانه‌ای اولیه عبارت‌اند از: دی‌اکسیدکربن، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) (IPCC, 2000). یکی از مباحث مهم، آثار زیست‌محیطی سیستم‌های تولید انرژی است. مصرف روزافزون انرژی در جهان و از طرفی محدودیت در منابع تأمین آن، دنیای امروز را با نوعی بحران انرژی روبه‌رو کرده است. باتری‌ها به‌عنوان یک وسیله ذخیره انرژی، به‌طور گسترده‌ای در وسایل و تجهیزات مختلف استفاده می‌شوند. استفاده از باتری‌های براساس لیتیوم با سرعت زیادی از دهه گذشته افزایش یافته است. این باتری‌ها برای کاربردهای گسترده‌ای برای ذخیره انرژی استفاده می‌شوند (Netz et al., 2003). امروزه انواع مختلفی از باتری‌های قابل شارژ استفاده می‌شوند که آثار بالقوه مختلفی بر میزان مصرف منابع، کیفیت اکوسیستم و سلامتی انسان دارند. به‌رغم اهمیت و کاربرد بسیار زیاد باتری‌ها، تا کنون مطالعات و توجه کمی به آثار زیست‌محیطی باتری‌ها و ریسک‌های بالقوه آن‌ها صورت گرفته است. بنابراین، برای حفظ محیط زیست لازم است مطالعات بیشتری نسبت به تأثیر اکولوژیکی محصولات الکترونیکی لحاظ شود (Bratt et al., 2011). بین تکنولوژی‌های باتری کنونی، تکنولوژی باتری لیتیوم یونی به‌علت میزان انرژی تولیدی (۲۱۰ وات‌ساعت در کیلوگرم)، که حدود ۲/۵ برابر تکنولوژی‌های دیگر است، به‌منزله بهترین گزینه معرفی شده‌اند (Tarascon & Armand, 2001).

یک گروه از مواد فعال استفاده‌شده به‌منزله آند باتری‌های لیتیوم یونی، اکسیدهای فلزی هستند. اکسیدهای فلزات برای اولین بار توسط Poizot و همکارانش به‌منزله مواد آند با کاربرد خوب برای باتری‌های لیتیوم یونی معرفی شدند و از آن زمان تا کنون پژوهش‌های بی‌شماری در مورد کاربرد این

مواد صورت گرفته است (Poizot et al., 2000). اکسیدهای فلزات واسطه مانند اکسید آهن، اکسید کبالت، اکسید نیکل و اکسید مس، ظرفیت‌های بالای حدود ۷۰۰ میلی‌آمپر ساعت در گرم را برای تولید انرژی نشان داده‌اند، که حدود دو برابر میزان گزارش‌شده برای مواد کربنی رایج (گرافیت) بوده است و می‌توانند جایگزین‌های امیدبخش برای کاربرد به‌منزله آند در باتری‌های لیتیوم یونی مطرح شوند (Laruelle et al., 2002; Gachot et al., 2008).

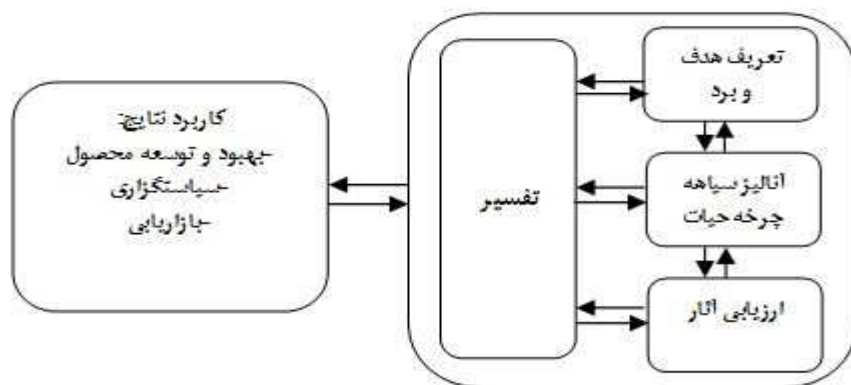
۱.۱. ارزیابی چرخه حیات

پژوهشگران برای محاسبه شاخص‌های تأثیرات بالقوه محیط زیست مرتبط با محصولات، از ارزیابی چرخه حیات (LCA)^۱ استفاده می‌کنند تا با توجه به آثار زیست‌محیطی کل چرخه حیات آن محصول، فرایندها و مراحل حساس از نظر تولید آلودگی‌های زیست‌محیطی را شناسایی کنند و در نتیجه برای ممانعت و کاهش آلودگی محیط زیست راهکاری ارائه دهند (Rebitzer et al., 2004). ارزیابی چرخه حیات، رویکردی برای گردآوری و ارزیابی همه ورودی‌ها، خروجی‌ها و آثار زیست‌محیطی مرتبط با یک محصول یا خدمات در طول عمر کلی آن است (Ciroth, 2012). یک ارزیابی چرخه حیات شامل چهار مرحله عمده است (Goedkoop et al., 2010) شامل:

گام اول: تعریف هدف و برد مطالعه؛ گام دوم: ساختن یک مدل چرخه حیات یک محصول با همه ورودی‌ها و خروجی‌ها (سیاهه چرخه حیات)؛ گام سوم: درک ارتباط زیست‌محیطی بین همه ورودی‌ها و خروجی‌ها (ارزیابی آثار چرخه حیات)؛ و گام چهارم: تفسیر مطالعه.^۵

شکل زیر این مراحل و چگونگی ارتباط آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد:

1. Life Cycle Assessment
2. Goal and Scope
3. Life Cycle Inventory (LCI)
4. Life Cycle Impact Assessment
5. Interpretation



شکل ۱. مراحل ارزیابی چرخه حیات (ISO 14040, 2006)

زغال سنگ بیشترین و فناوری‌های برق برپایه انرژی بادی کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را سبب می‌شود. این پژوهشگران همچنین گزارش دادند که برای مقابله با پدیده تغییر آب و هوا و کاهش آثار آن در بخش انرژی که شامل افزایش تقاضای برق بر اثر افزایش میانگین دما، کاهش منابع آب بر اثر تغییر میزان بارندگی و الگوی بارش و... است، باید برنامه‌ریزی جامعی در مورد راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش برق و انرژی کشور صورت گیرد، که شاخص‌ترین آن‌ها در کوتاه‌مدت افزایش راندمان نیروگاه‌ها و استفاده از سوخت‌های پاک در برنامه‌های توسعه بخش نیروگاهی و در بلندمدت، افزایش سهم نیروگاه‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی کشور با تأکید بر انرژی باد، برق آبی و زمین‌گرمایی و افزایش سهم نیروگاه‌های اتمی با ملاحظات ویژه زیست‌محیطی (مدیریت سوخت و محل دفن ضایعات) خواهد بود. مطالعات دیگر ارزیابی سیستم‌های انرژی توسط Kargari و Mastoori (2010) انجام شد و انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات فناوری‌های مختلف تولید برق (شامل نیروگاه‌های با سوخت فسیلی، نیروگاه‌های هسته‌ای، نیروگاه‌های فتوولتائیک، نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های برق آبی و نیروگاه‌های زیست‌توده) بررسی شد. این پژوهشگران گزارش دادند که عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات نیروگاه‌های سوخت فسیلی مربوط به

در نگرش نوین توجه به مسائل زیست‌محیطی فرآورده‌های صنعتی، کلیه مراحل حیات یک ماده تولیدی از تهیه و تأمین مواد خام تا کاربری و بازیافت به صورتی جامع و فراگیر ارزیابی می‌شود، تا بتوان آثار مثبت را تشدید و جوانب منفی را به حداقل رساند (Torkian *et al.*, 2001). در مورد ارزیابی چرخه حیات سیستم‌های انرژی و باتری‌ها تا کنون مطالعات مختلفی شده است. Vatankhah و همکارانش (2001) ارزیابی باتری‌های اسید-سربی که برای استارت، روشنایی و احتراق در خودروها به کار می‌روند را بررسی کرده‌اند. این پژوهشگران گزارش دادند که بازیافت این باتری‌ها که حدود ۷۰ درصد مصرف سرب تولیدی دنیا را شامل می‌شوند، مورد توجه کارخانجات تولیدکننده سرب قرار گرفته است. در مطالعه‌ای توسط Saedi و همکارانش (2006) مدیریت زیست‌محیطی نیروگاه‌ها بررسی شد. این پژوهشگران در این مطالعه، روش‌های تولید برق با سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای را با بیشترین آلودگی گزارش دادند که برحسب روش تولید ممکن است گازها، ذرات معلق، انواع پساب‌ها و یا مواد زائد جامد و خطرناک باشند. در مطالعه انجام‌شده توسط Mousavi و Khodi (2009) با بررسی دی‌اکسیدکربن منتشره (به‌منزله شاخص‌ترین گاز گلخانه‌ای) در هر واحد برق تولیدی از انواع فناوری‌های تولیدکننده برق، به این نتیجه رسیدند که فناوری‌های تولید برق برپایه

تعیین می‌شود و همچنین تعریف دقیقی از محصول و چرخه حیات آن و عملکرد آن ارائه می‌شود و واحد عملکردی^۱ به‌ویژه زمانی که چند محصول مورد مقایسه قرار می‌گیرند، تعریف می‌شود. محدوده مطالعه شده و همچنین فرضیات مورد نظر نیز تعیین می‌شوند (Goedkoop *et al.*, 2010). عمق و گستره هر مطالعه ارزیابی چرخه حیات براساس هدف آن تغییر می‌کند (ISO 14044, 2006). در این مطالعه فرض بر آن بوده است که در سناریوی اول یعنی با استفاده از گرافیت به‌منزله ماده فعال الکترود بتوان به بیشترین ظرفیت تئوری ذخیره و تولید انرژی توسط آن یعنی ۳۷۲ میلی‌آمپر ساعت در هر گرم گرافیت (Zhaolin & Siok, 2012) و از سوی دیگر در سناریوی دوم بتوان به‌ازای مصرف هر گرم اکسید کبالت به بیشترین ظرفیت تئوری ذخیره و تولید انرژی توسط آن یعنی ۷۱۶ میلی‌آمپر ساعت در هر گرم اکسید کبالت (Peng *et al.*, 2012) دست یافت. ظرفیت تئوری یک سلول در واقع با مقدار ماده فعال در آن تعیین می‌شود و به‌منزله کل میزان الکتریسیته شرکت‌کننده در واکنش الکتروشیمیایی آن بیان می‌شود و با واحد کلمب یا آمپرساعت تعیین می‌شود. ظرفیت یک باتری مستقیماً به میزان انرژی الکتریسیته قابل دستیابی از مواد فعال آن مربوط است (Linden & Reddy, 2001). هدف از این مطالعه تعیین میزان انتشار آثار زیست‌محیطی با استفاده از دو ماده مختلف به‌منزله مواد فعال استفاده شده در آند باتری‌های لیتیوم یونی (یعنی گرافیت به‌عنوان ماده فعال آند تجاری و اکسید کبالت به‌عنوان یکی از آینده‌های امیدبخش با ظرفیت ذخیره و تولید انرژی بالا که اخیراً مطالعات زیادی روی آن می‌شود)، است. چگونگی اثر افزایش ظرفیت ذخیره و تولید انرژی توسط باتری و بازافت باتری بر تغییر آثار زیست‌محیطی از دیگر اهداف بررسی شده است که تا کنون مطالعات کمی درباره آن انجام شده است.

بهره‌برداری از نیروگاه است. در مورد نیروگاه‌های هسته‌ای و بیومس، بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات ناشی از مرحله فناوری سوخت است، اما در مورد نیروگاه‌های فتوولتائیک، بادی و برق‌آبی، مرحله ساخت نیروگاه و تولید زیرساخت‌های اولیه موجب انتشار بخش عمده گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات این نیروگاه‌هاست. برای نشان دادن آثار زیست‌محیطی باتری‌های قابل شارژ، Matheys و همکارانش شاخص‌های زیست‌محیطی پنج باتری خودروهای الکتریکی را با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات مقایسه کردند (Matheys *et al.*, 2009). در مطالعه‌ای دیگر توسط Zackrisson و همکارانش، یک ارزیابی چرخه حیات دو نوع باتری لیتیوم یونی برای بهینه‌کردن طراحی باتری‌های لیتیوم یونی برای استفاده در خودروهای الکتریکی هیبریدی صورت گرفت (Zackrisson *et al.*, 2010). نتایج مطالعات ارزیابی چرخه حیات سه نوع باتری (باتری نیکل-هیدرید فلزی، باتری‌های لیتیوم یونی با کاتد لیتیوم-نیکل-کبالت-اکسید منگنز و باتری‌های لیتیوم یونی با کاتد لیتیوم-آهن-فسفات) برای خودروهای الکتریکی و خودروهای هیبریدی توسط Majeau-Bettez و همکارانش ارائه شد (Majeau-Bettez *et al.*, 2011). آثار زیست‌محیطی و انرژی مورد نیاز باتری‌های کلریدسدیم-نیکل توسط Longo و همکارانش در سال ۲۰۱۳ گزارش شد (Longo *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای در مورد بازافت منابع، Carl دریافت که با افزایش مصرف سرب بازیافتی از ۵۰ درصد تا ۹۹ درصد، مصرف توان و انرژی در مرحله تولید از ۴۳ درصد تا ۸ درصد کاهش می‌یابد. این مطالعه همچنین اشاره داشت که مصرف منابع مانند کاربری زمین در یک چرخه شارژ-دشارژ نیز ممکن است با افزایش تعداد چرخه‌ها، کاهش یابد (Carl, 1999).

۲.۱. تعریف هدف و برد

در گام اول، دلیل اجرای ارزیابی چرخه حیات

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مدل ارزیابی چرخه حیات

مدل‌سازی ارزیابی چرخه حیات در این مطالعه براساس استانداردهای سری (ایزو ۱۴۰۴۰ ISO 14040, 2006) و سری (ایزو ۱۴۰۴۴, ISO 14044, 2006) که استانداردهای پایه برای انجام ارزیابی چرخه حیات یک فرایند هستند، انجام شده است. مدل ارزیابی چرخه حیات در این مطالعه براساس باتری‌های لیتیوم یونی با سه آند متفاوت گرافیت، اکسید کبالت و همچنین اکسید کبالت بازیافت‌شده که بیانگر سه سناریو در مدل ارزیابی چرخه حیات هستند، طراحی شد. میزان وزنی اولیه اجزای مورد نیاز برای هر کدام براساس تجربیات آزمایشگاهی، منابع و گزارش‌های مستندشده تعیین شد. به این صورت که نسبت وزنی ماده فعال آند به بایندر (PVDF)^۱ که تا ۵ درصد در حلال NMP^۲ رقیق شد، به صورت ۹۰:۱۰ بوده است. سپس تمام اجزای تشکیل‌دهنده و استفاده‌شده در باتری شامل ماده فعال (همان ماده آند سنتزی)، مواد الکترولیت شامل LiPF₆^۳ در حلال NMP، اتیلن کربنات و دی‌متیل کربنات و بایندر سیاه‌نویسی شدند.

۲.۲. واحد عملکردی

یک مبحث مهم در مقایسه دو یا چند محصول، تعیین واحد عملکردی یا اساس مقایسه است. در بیشتر موارد، هنگامی که دو محصول مختلف ویژگی‌های عملکردی مختلفی دارند، مقایسه ساده آن‌ها امکان‌پذیر نیست. در این مطالعه واحد عملکردی ۱۰۰۰ میلی‌آمپر ساعت ظرفیت ذخیره و تولید انرژی توسط ماده فعال آند باتری تعیین شده است. سپس مقدار وزنی مواد استفاده‌شده برای هر باتری ثبت شد.

وزن واقعی و اولیه مواد فعال گرافیت و اکسید کبالت هر دو یکسان و به میزان ۹۰ گرم در نظر

گرفته شد و در نهایت وزن نرمال‌شده همه اجزای استفاده‌شده با تأثیرگذاری واحد عملکردی مورد نظر محاسبه شد. برای حصول میزان ظرفیت ذخیره و تولید انرژی برابر با ۱۰۰۰ میلی‌آمپر ساعت توسط باتری، باید ۲/۶۹ گرم گرافیت و ۱/۴۰ گرم اکسید کبالت به‌منزله مواد فعال آند مصرف شوند. نرمال‌سازی وزن مواد مختلف استفاده‌شده براساس واحد عملکردی مورد نظر در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

همان‌طور که جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند، اکسید کبالت پس از نرمال‌سازی وزن آن نسبت به گرافیت، وزن کمتری را برای ارائه یک میزان یکسان از انرژی تولیدی نیاز دارد، که بیانگر شدت بالاتر انرژی در واحد جرم این ماده است.

۳.۲. مرز سیستم مطالعه‌شده

برای هرگونه مطالعه ارزیابی چرخه حیات، ابتدا باید محدوده سیستم بررسی شده تعیین شود. در این مطالعه، همه مواد از نقطه استخراج تا استفاده باتری بررسی شدند (GREET 2, 2013).

۴.۲. ارزیابی آثار چرخه حیات (LCIA)

برای مقایسه آثار زیست‌محیطی باتری‌های مختلف سنتزی، داده‌های مربوط به آثار زیست‌محیطی از مدل ارزیابی چرخه حیات GREET2 تهیه شد (GREET2, 2013). سپس گازهای خروجی سیاه‌نویسی شده در طبقات مختلف آثر زیست‌محیطی، طبقه‌بندی و سپس براساس واحدهای معادل هر طبقه‌اثر، ویژگی‌سازی شدند. مواد سیاه‌نویسی شده شامل CO₂، CH₄، N₂O، CFC₁₁، CO جزء طبقه‌اثر گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند، که براساس واحد معادل (Kg CO₂) ویژگی‌سازی می‌شوند. مواد سیاه‌نویسی شده شامل گازهای VOC، CH₄، CO، NO_x و PM جزء طبقه‌اثر مه‌دود فتوشیمیایی محسوب می‌شوند و براساس واحد معادل (Kg C₂H₄) ویژگی‌سازی می‌شوند. واحد معادل طبقه‌اثر مصرف منابع انرژی گیگاژول است. برای تبدیل داده‌های سیاه‌نویسی

1. Polyvinylidene fluoride (PVDF)
2. N-Methyl-2- Pyrrolidinone (NMP)
3. Lithium hexafluorophosphate (LiPF₆)

طبقه‌اثر را نشان می‌دهد. پس از آن، فاکتورهای ویژگی‌سازی شده و نرمال‌شده در هر سناریو در وزن نسبی هر طبقه ضرب و در نهایت این مقادیر با هم جمع می‌شوند، تا شاخص اکولوژیکی برای هر یک از سناریوها به دست آید.

شده به واحد معادل هر طبقه‌اثر، باید ابتدا مشخص شود که هر داده سیاهه‌نویسی شده مربوط به هر طبقه اثر با چه نسبتی یا فاکتور ویژگی‌سازی به واحد معادل آن طبقه اثر تبدیل می‌شود. مجموع مقادیر معادل‌شده آن‌ها در هر طبقه‌اثر، ارزش معادل آن

جدول ۱. نسبت‌های وزنی واقعی و نرمال‌شده و ظرفیت تئوری ذخیره و تولید انرژی نیم‌سلول آند با ماده فعال گرافیت

مواد مصرفی	نسبت وزنی (درصد)	وزن واقعی (گرم)	وزن نرمال‌شده (گرم)
ماده فعال (گرافیت)	۹۰	۹۰	۲/۶۹
بایندر PVDF ۵درصد در حلال NMP	۱۰	۱۰	۰/۳۰
کل وزن مواد فعال و بایندر	۱۰۰		۲/۹۹
ماده PVDF در بایندر		۰/۵۰	۰/۰۱
ماده NMP در بایندر		۹/۵۰	۰/۲۸
ماده NMP به‌منزله حلال		۳۰۹	۹/۲۳
کل میزان NMP		۳۱۸/۵۰	۹/۵۱
الکترولیت LiPF_6		۱۱/۶۲	۰/۳۵
اتیلن کربنات		۴۹/۵۰	۱/۴۸
دی‌متیل کربنات		۴۰/۱۳	۱/۲۰
ظرفیت تئوری (mAh/g)	۳۷۲		
واحد عملکردی (mAh)	۱۰۰۰		

جدول ۲. نسبت‌های وزنی واقعی و نرمال‌شده و ظرفیت تئوری ذخیره و تولید انرژی نیم‌سلول آند با ماده فعال اکسید کبالت

مواد مصرفی	نسبت وزنی (درصد)	وزن واقعی (گرم)	وزن نرمال‌شده (گرم)
ماده فعال (اکسید کبالت)	۹۰	۹۰	۱/۴۰
بایندر PVDF ۵درصد در حلال NMP	۱۰	۱۰	۰/۱۶
کل وزن مواد فعال و بایندر	۱۰۰		۱/۵۵
ماده PVDF در بایندر		۰/۵۰	۰/۰۱
ماده NMP در بایندر		۹/۵۰	۰/۱۵
ماده NMP به‌منزله حلال		۳۰۹	۴/۸۰
کل میزان NMP		۳۱۸/۵۰	۴/۹۴
الکترولیت LiPF_6		۱۱/۶۲	۰/۱۸
اتیلن کربنات		۴۹/۵۰	۰/۷۷
دی‌متیل کربنات		۴۰/۱۳	۰/۶۲
ظرفیت تئوری (mAh/g)	۷۱۶		
واحد عملکردی (mAh)	۱۰۰۰		

۳. نتایج

(Boustead *et al.*, 2000).

تمام مقادیر مربوط به آثار محیط زیست، مربوط به باتری‌های تحت شرایط واحد عملکردی تعیین شده هستند. جدول‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب مقادیر سیاه‌نویسی شده هر یک از اجزای سه سناریوی مطالعه شده یعنی باتری‌های با آند گرافیت، اکسید کبالت و اکسید کبالت بازیافت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳ فاکتورهای ویژگی‌سازی مربوط به طبقه‌اثر گازهای گلخانه‌ای (Huijbregts *et al.*, 2000)، طبقه‌اثر گازهای اسیدی و طبقه‌اثر مه‌دود فتوشیمیایی (Boustead *et al.*, 2000) را نشان می‌دهد. جدول ۴ وزن‌های نسبی در نظر گرفته شده را برای هر طبقه‌اثر زیست‌محیطی نشان می‌دهد.

جدول ۳. فاکتورهای ویژگی‌سازی طبقات اثر زیست‌محیطی

طبقات اثر زیست‌محیطی	فاکتورهای ویژگی‌سازی	ماده سیاه‌نویسی شده
طبقه‌اثر گازهای گلخانه‌ای	۱	CO ₂
	۲۱	CH ₄
	۳۲۰	N ₂ O
	۴۰۰۰	CFC11
	۲	CO
	۱۱۰	TCA
طبقه‌اثر گازهای اسیدی	۱/۰۷	NO _x
	۱	SO _x
	۰/۸۸	HCl
طبقه‌اثر مه‌دود فتوشیمیایی	۰/۶	VOC
	۰/۳	CO
	۰/۰۰۷	CH ₄
	۰/۰۲۸	NO _x
	۰/۰۷	PM

(Boustead *et al.*, 2000) و (Huijbregts *et al.*, 2000)

جدول ۴. وزن‌های نسبی طبقات اثر مطالعه شده براساس روش مدل‌سازی MET

طبقات اثر زیست‌محیطی	وزن
طبقه‌اثر مصرف منابع انرژی	۰/۸۸
طبقه‌اثر گازهای گلخانه‌ای	۰/۸۹
طبقه‌اثر گازهای اسیدی	۰/۴۰
طبقه‌اثر مه‌دود فتوشیمیایی	۰/۲۹

(Boustead *et al.*, 2000)

جدول ۵. آثار زیست محیطی و انرژی مصرفی نیم سلول آند با ماده فعال گرافیت به ازای واحد عملکردی ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت

آثار زیست محیطی (سیاهه چرخه حیات) (g/g)	ماده فعال (گرافیت)	بایندر PVDF ۵ درصد در حلال NMP	ماده NMP به منزله حلال	الکترولیت LiPF ₆	اتیلن کربنات	دی متیل کربنات
VOC	۶/۱۰×۱۰ ^{-۴}	۸/۸۱×۱۰ ^{-۵}	۳/۶۹×۱۰ ^{-۴}	۴/۷۴×۱۰ ^{-۴}	۱/۸۲×۱۰ ^{-۴}	۵/۴۰×۱۰ ^{-۴}
CO	۱/۵۸×۱۰ ^{-۳}	۲/۶۱×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۹×۱۰ ^{-۳}	۱/۲۴×۱۰ ^{-۳}	۴/۰۲×۱۰ ^{-۴}	۱/۲۰×۱۰ ^{-۳}
NO _x	۵/۷۸×۱۰ ^{-۳}	۹/۷۶×۱۰ ^{-۴}	۳/۹۳×۱۰ ^{-۳}	۵/۹۴×۱۰ ^{-۳}	۱/۴۸×۱۰ ^{-۳}	۴/۴۰×۱۰ ^{-۳}
PM	۹/۶۴×۱۰ ^{-۴}	۲/۷۵×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۳×۱۰ ^{-۳}	۲/۳۶×۱۰ ^{-۳}	۲/۸۰×۱۰ ^{-۴}	۸/۲۳×۱۰ ^{-۴}
SO _x	۲/۹۹×۱۰ ^{-۳}	۱/۳۲×۱۰ ^{-۳}	۵/۰۳×۱۰ ^{-۳}	۱/۲۶×۱۰ ^{-۲}	۸/۴۳×۱۰ ^{-۴}	۲/۴۶×۱۰ ^{-۳}
CH ₄	۱/۱۶×۱۰ ^{-۲}	۱/۶۵×۱۰ ^{-۳}	۶/۹۶×۱۰ ^{-۳}	۸/۰۰×۱۰ ^{-۳}	۳/۸۳×۱۰ ^{-۳}	۱/۱۴×۱۰ ^{-۲}
N ₂ O	۵/۲۶×۱۰ ^{-۵}	۱/۵۴×۱۰ ^{-۵}	۶/۵۸×۱۰ ^{-۵}	۷/۱۷×۱۰ ^{-۵}	۱/۶۳×۱۰ ^{-۵}	۴/۹۱×۱۰ ^{-۵}
CO ₂	۰/۲۳×۱۰ ^{+۱}	۷/۰۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۲۹×۱۰ ^{+۱}	۰/۴۶×۱۰ ^{+۱}	۵/۵۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۷×۱۰ ^{+۱}
کل مصرف انرژی (Gj)	۱/۱۰×۱۰ ^{-۴}	۱/۰۷×۱۰ ^{-۵}	۴/۳۸×۱۰ ^{-۵}	۶/۴۲×۱۰ ^{-۵}	۳/۱۳×۱۰ ^{-۵}	۹/۲۴×۱۰ ^{-۵}

و مصرف انرژی در مورد ماده فعال اکسید کبالت بیشترین مقدار است.

نتایج جدول ۷ در مورد نیم سلول آند با ماده فعال اکسید کبالت باز یافت شده، مشخص می کند که میزان گازهای شرکت کننده بر اثر گلخانه ای و گازهای اسیدی در مورد ماده الکترولیت بیشتر است و کل گازهای شرکت کننده در تشکیل مه دود فتوشیمیایی در مورد ماده فعال اکسید کبالت باز یافتی بیشتر و میزان مصرف انرژی مربوط به ماده حلال الکترولیت (دی متیل کربنات) بیشترین مقدار است.

همان طور که از جدول ۵ مشخص است، در مورد نیم سلول آند با ماده فعال گرافیت، میزان گازهای شرکت کننده بر اثر گلخانه ای و گازهای اسیدی در مورد ماده الکترولیت بیشتر است و کل گازهای شرکت کننده در تشکیل مه دود فتوشیمیایی و همچنین میزان مصرف انرژی مربوط به ماده فعال گرافیت بیشترین مقدار است. از سوی دیگر نتایج جدول ۶ در مورد نیم سلول آند با ماده فعال اکسید کبالت، نشان می دهد که میزان گازهای شرکت کننده بر اثر گلخانه ای، گازهای اسیدی، مه دود فتوشیمیایی

جدول ۶. آثار زیست محیطی و انرژی مصرفی نیم سلول آند با ماده فعال اکسید کبالت به ازای واحد عملکردی ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت

آثار زیست محیطی (سیاهه چرخه حیات) (g/g)	ماده فعال (اکسید کبالت)	بایندر PVDF ۵ درصد در حلال NMP	ماده NMP به منزله حلال	الکترولیت LiPF ₆	اتیلن کربنات	دی متیل کربنات
VOC	۱/۸۷×۱۰ ^{-۳}	۴/۵۸×۱۰ ^{-۵}	۱/۹۲×۱۰ ^{-۴}	۲/۴۶×۱۰ ^{-۴}	۹/۴۵×۱۰ ^{-۵}	۲/۸۱×۱۰ ^{-۴}
CO	۶/۲۸×۱۰ ^{-۳}	۱/۳۶×۱۰ ^{-۴}	۵/۶۹×۱۰ ^{-۴}	۶/۴۶×۱۰ ^{-۴}	۲/۰۹×۱۰ ^{-۴}	۶/۲۴×۱۰ ^{-۴}
NO _x	۲/۸۲×۱۰ ^{-۲}	۵/۰۷×۱۰ ^{-۴}	۲/۰۴×۱۰ ^{-۳}	۳/۰۹×۱۰ ^{-۳}	۷/۷۰×۱۰ ^{-۴}	۲/۲۹×۱۰ ^{-۳}
PM	۹/۸۵×۱۰ ^{-۳}	۱/۴۳×۱۰ ^{-۴}	۵/۳۳×۱۰ ^{-۴}	۱/۲۳×۱۰ ^{-۳}	۱/۴۶×۱۰ ^{-۴}	۴/۲۸×۱۰ ^{-۴}
SO _x	۳/۲۲×۱۰ ^{-۲}	۶/۸۵×۱۰ ^{-۴}	۲/۶۱×۱۰ ^{-۳}	۶/۵۵×۱۰ ^{-۳}	۴/۳۸×۱۰ ^{-۴}	۱/۲۸×۱۰ ^{-۳}
CH ₄	۳/۵۲×۱۰ ^{-۲}	۸/۵۶×۱۰ ^{-۴}	۳/۶۲×۱۰ ^{-۳}	۴/۱۶×۱۰ ^{-۳}	۱/۹۹×۱۰ ^{-۳}	۵/۹۱×۱۰ ^{-۳}
N ₂ O	۲/۹۵×۱۰ ^{-۴}	۸/۰۰×۱۰ ^{-۶}	۳/۴۲×۱۰ ^{-۵}	۳/۷۲×۱۰ ^{-۵}	۸/۴۷×۱۰ ^{-۶}	۲/۵۵×۱۰ ^{-۵}
CO ₂	۱/۷۹×۱۰ ^{+۱}	۳/۶۸×۱۰ ^{-۱}	۰/۱۵×۱۰ ^{+۱}	۰/۲۴×۱۰ ^{+۱}	۲/۹۰×۱۰ ^{-۱}	۸/۶۶×۱۰ ^{-۱}
کل مصرف انرژی (Gj)	۲/۵۶×۱۰ ^{-۴}	۵/۵۶×۱۰ ^{-۶}	۲/۲۸×۱۰ ^{-۵}	۳/۳۴×۱۰ ^{-۵}	۱/۶۲×۱۰ ^{-۵}	۴/۸۰×۱۰ ^{-۵}

جدول ۷. آثار زیست محیطی و انرژی مصرفی نیم سلول آند با ماده فعال اکسید کبالت بازیافت شده به ازای واحد عملکردی ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت

دی متیل کربنات	اتیلن کربنات	الکترولیت LiPF ₆	ماده NMP به منزله حلال	بایندر PVDF درصد در حلال NMP	ماده فعال (اکسید کبالت بازیافت شده)	آثار زیست محیطی (سیاهه چرخه حیات) (g/g)
$2/81 \times 10^{-4}$	$9/45 \times 10^{-5}$	$2/46 \times 10^{-4}$	$1/92 \times 10^{-4}$	$4/58 \times 10^{-5}$	$2/76 \times 10^{-4}$	VOC
$6/24 \times 10^{-4}$	$2/09 \times 10^{-4}$	$6/46 \times 10^{-4}$	$5/69 \times 10^{-4}$	$1/36 \times 10^{-4}$	$8/66 \times 10^{-4}$	CO
$2/29 \times 10^{-3}$	$7/70 \times 10^{-4}$	$3/09 \times 10^{-3}$	$2/04 \times 10^{-3}$	$5/07 \times 10^{-4}$	$2/93 \times 10^{-3}$	NO _x
$4/28 \times 10^{-4}$	$1/46 \times 10^{-4}$	$1/23 \times 10^{-3}$	$5/33 \times 10^{-4}$	$1/43 \times 10^{-4}$	$6/52 \times 10^{-4}$	PM
$1/28 \times 10^{-3}$	$4/38 \times 10^{-4}$	$6/55 \times 10^{-3}$	$2/61 \times 10^{-3}$	$6/85 \times 10^{-4}$	$2/69 \times 10^{-3}$	SO _x
$5/91 \times 10^{-3}$	$1/99 \times 10^{-3}$	$4/16 \times 10^{-3}$	$3/62 \times 10^{-3}$	$8/56 \times 10^{-4}$	$5/40 \times 10^{-3}$	CH ₄
$2/55 \times 10^{-5}$	$8/47 \times 10^{-6}$	$3/72 \times 10^{-5}$	$3/42 \times 10^{-5}$	$8/00 \times 10^{-6}$	$5/11 \times 10^{-5}$	N ₂ O
$8/66 \times 10^{-1}$	$2/90 \times 10^{-1}$	$0/34 \times 10^{+1}$	$0/15 \times 10^{+1}$	$3/68 \times 10^{-1}$	$0/20 \times 10^{+1}$	CO ₂
$4/80 \times 10^{-5}$	$1/62 \times 10^{-5}$	$3/34 \times 10^{-5}$	$2/28 \times 10^{-5}$	$5/56 \times 10^{-6}$	$3/19 \times 10^{-5}$	کل مصرف انرژی (Gj)

جدول ۸. کل آثار زیست محیطی و مصرف انرژی هریک از سه سناریوی مطالعه شده

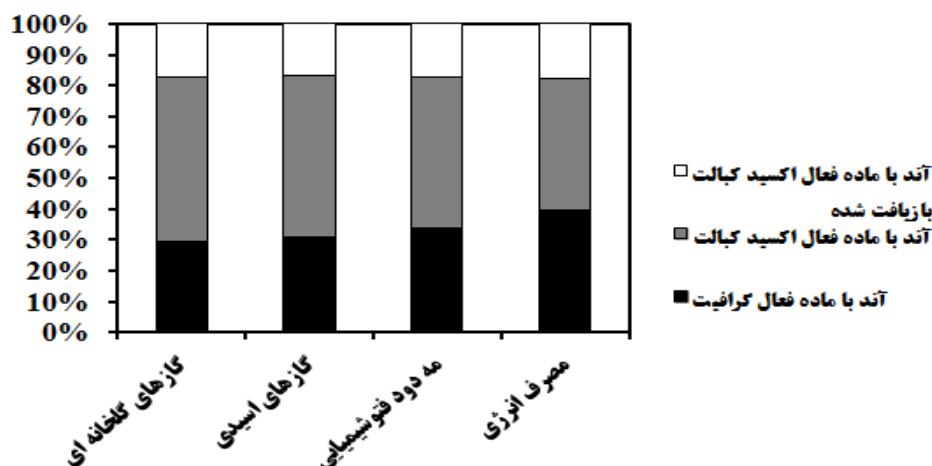
آند با ماده فعال اکسید کبالت بازیافت شده	آند با ماده فعال اکسید کبالت	آند با ماده فعال گرافیت	کل آثار زیست محیطی و مصرف انرژی
$1/14 \times 10^{-3}$	$2/73 \times 10^{-3}$	$2/26 \times 10^{-3}$	VOC
$3/05 \times 10^{-3}$	$8/46 \times 10^{-3}$	$5/79 \times 10^{-3}$	CO
$1/16 \times 10^{-2}$	$3/69 \times 10^{-2}$	$2/25 \times 10^{-2}$	NO _x
$3/13 \times 10^{-3}$	$1/23 \times 10^{-2}$	$5/73 \times 10^{-3}$	PM
$1/42 \times 10^{-2}$	$4/37 \times 10^{-2}$	$2/52 \times 10^{-2}$	SO _x
$2/19 \times 10^{-2}$	$5/17 \times 10^{-2}$	$4/34 \times 10^{-2}$	CH ₄
$1/64 \times 10^{-4}$	$4/08 \times 10^{-4}$	$2/71 \times 10^{-4}$	N ₂ O
$0/74 \times 10^{+1}$	$2/33 \times 10^{+1}$	$1/27 \times 10^{+1}$	CO ₂
$1/58 \times 10^{-4}$	$3/82 \times 10^{-4}$	$3/53 \times 10^{-4}$	کل مصرف انرژی (Gj)

گلخانه ای در آند با ماده فعال اکسید کبالت بیشترین مقدار و با ماده فعال اکسید کبالت بازیافتی کمترین مقدار است.

جدول ۹ نتایج نهایی طبقه بندی آثار زیست محیطی و شاخص اکولوژیکی هریک از سه سناریوی مطالعه شده را نشان می دهد.

جدول ۸ نتایج مربوط به کل آثار زیست محیطی و مصرف انرژی مربوط به هریک از سه سناریوی مطالعه شده را نشان می دهد.

شکل ۲ نسبت این آثار را در هریک از سه سناریوی مطالعه شده به خوبی نشان می دهد. همان طور که مشخص است، نسبت انرژی مصرفی، مه دود فتوشیمیایی، گازهای اسیدی و گازهای



شکل ۲. کل آثار زیست‌محیطی و مصرف انرژی هریک از سه سناریوی مطالعه‌شده

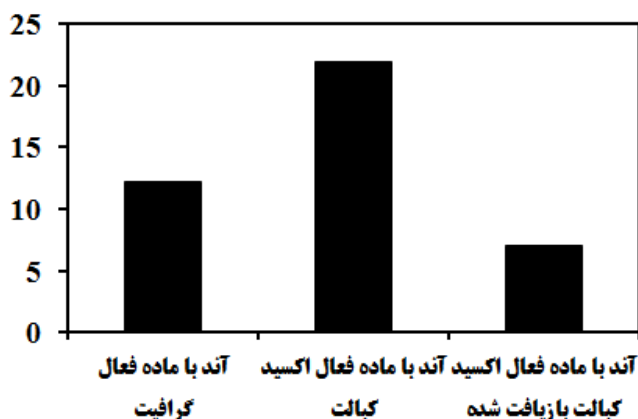
جدول ۹. طبقه‌بندی آثار زیست‌محیطی هریک از سه سناریوی مطالعه‌شده

طبقه‌بندی آثار زیست‌محیطی	آند با ماده فعال	آند با ماده فعال	آند با ماده فعال اکسید کربالت
کربالت	کربالت	کربالت	باز یافت شده
گازهای گلخانه‌ای (Kg CO ₂)	$1/37 \times 10^{+1}$	$2/45 \times 10^{+1}$	$0/80 \times 10^{+1}$
گازهای اسیدی (Kg SO ₂)	$4/93 \times 10^{-2}$	$8/32 \times 10^{-2}$	$2/67 \times 10^{-2}$
مه‌دود فتوشیمیایی (Kg C ₂ H ₄)	$4/43 \times 10^{-3}$	$6/44 \times 10^{-3}$	$2/29 \times 10^{-3}$
مصرف انرژی (Gj)	$3/53 \times 10^{-4}$	$3/82 \times 10^{-4}$	$1/58 \times 10^{-4}$
شاخص اکولوژیکی	$0/12 \times 10^{+2}$	$2/19 \times 10^{+1}$	$0/71 \times 10^{+1}$

توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۳ صورت می‌گیرد. مجموع مقادیر معادل‌شده داده‌های سیاه‌نویسی شده در هر طبقه‌اثر، ارزش معادل آن طبقه‌اثر را نشان می‌دهد. سپس فاکتورهای ویژگی‌سازی شده و نرمال‌شده در هر سناریو در وزن نسبی هر طبقه براساس اطلاعات مندرج در جدول ۴ مبتنی بر روش مدل‌سازی MET ضرب و در نهایت این مقادیر با هم جمع می‌شوند تا شاخص اکولوژیکی برای هر یک از سناریوها به دست آید.

شکل ۳ نشان می‌دهد که شاخص اکولوژیکی آند با ماده فعال اکسید کربالت، بیشترین مقدار و آند با ماده فعال اکسید کربالت باز یافتی، کمترین مقدار است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که باز یافت باتری، اثر بسیار زیادی بر کاهش آثار زیست‌محیطی آن دارد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، در نهایت شاخص اکولوژیکی آند با ماده فعال اکسید کربالت باز یافت‌شده از دیگر سناریوها کمتر است که در شکل ۳ نشان داده شده است. شاخص اکولوژیکی یک ماده یا یک فرایند در واقع یک عدد بدون واحد است که براساس داده‌های استخراج‌شده از ارزیابی چرخه حیات به دست می‌آید و هرچه این شاخص بیشتر باشد، به این معناست که آثار زیست‌محیطی بیشتری تولید می‌شود (Taoussanidis, 2006; Goedkoop, 2000). در این مطالعه پس از تهیه سیاهه چرخه حیات توسط داده‌های مربوط به آثار زیست‌محیطی به دست آمده از مدل ارزیابی چرخه حیات GREET2، طبقه‌بندی آثار زیست‌محیطی و ویژگی‌سازی براساس واحدهای معادل هر طبقه‌اثر براساس فاکتورهای ویژگی‌سازی روش CML، با



شکل ۳. شاخص اکولوژیکی هر یک از سه سناریوی مطالعه شده

۴. بحث و نتیجه گیری

با بررسی اثر سرعت سوزاندن بر میزان شاخص اکولوژیکی، باتری‌های نیکل-هیدرید فلزی نسبت به باتری‌های لیتیوم یونی اثرپذیری بیشتری را نشان دادند. پژوهشگران این نتایج را دلیلی بر لزوم متفاوت بودن سیاست‌ها و قوانین در مورد نحوه دفع این دو نوع باتری دانستند. شاخص اکولوژیکی این دو نوع باتری با افزایش سرعت بازیافت آن‌ها، کاهش یافت که در واقع به این معناست که باید سیاست‌های بازیافت جدی برای آن‌ها در نظر گرفته شود (Yu et al., 2014). در مطالعه انجام شده توسط Carl نیز گزارش داده شد که با افزایش مصرف سرب بازیافتی از ۵۰ درصد تا ۹۹ درصد، مصرف توان و انرژی در مرحله تولید از ۴۳ درصد تا ۸ درصد کاهش می‌یابد. این مطالعه همچنین اشاره داشت که مصرف منابع مانند کاربری زمین در یک چرخه شارژ-دشارژ نیز ممکن است با افزایش تعداد چرخه‌ها، کاهش یابد (Carl, 1999).

همچنین از نتایج مطالعه حاضر می‌توان دریافت که افزایش ظرفیت به‌ازای واحد جرم ماده همیشه نمی‌تواند ارجحیت داشتن کارکرد از نظر زیست‌محیطی آن‌ها را تضمین کند، بلکه روش سنتز ماده استفاده شده نیز نقش مهمی در مقایسه آثار چرخه حیات سیستم‌های باتری مختلف دارد. چنانچه گروهی از پژوهشگران (Bossche et al., 2006) نیز با مطالعه ارزیابی زیست‌محیطی انواع مختلف باتری‌ها برای کاربرد در خودروهای الکتریکی

همان‌طور که نتایج در این مطالعه نشان می‌دهند، با توجه به میزان انرژی تولیدی متفاوت توسط هر ماده فعال به‌منزله آند باتری‌های لیتیوم یونی، برای دستیابی به یک ظرفیت ذخیره و تولید انرژی برابر توسط این مواد، مقادیر وزنی مختلفی از آن‌ها لازم است. در این مطالعه نتایج ارزیابی آثار محیط زیست باتری‌های با آند گرافیت و اکسید کبالت نشان می‌دهند که اکسید کبالت آثار گازهای گلخانه‌ای، گازهای اسیدی، مه‌دود فتوشیمیایی و مصرف انرژی بیشتری نسبت به گرافیت دارد. در اینجا می‌توان دریافت که افزایش ظرفیت به‌ازای واحد جرم ماده همیشه نمی‌تواند ارجحیت داشتن کارکرد از نظر زیست‌محیطی آن‌ها را تضمین کند، بلکه روش سنتز ماده استفاده شده نیز نقش مهمی در مقایسه آثار چرخه حیات سیستم‌های باتری مختلف دارد. در مقابل، اکسید کبالت در صورت بازیافت می‌تواند به‌طرز قابل توجهی آثار آن کاهش یابد و در نتیجه می‌توان به باتری‌های کوچک‌تر با وزن کمتر و شدت انرژی بیشتر با آثار زیست‌محیطی کمتر دست یافت. همچنین بازیافت باتری‌ها می‌تواند حتی نگرانی برای کمیاب بودن فلزات استفاده شده را نیز کاهش دهد. نتایج مطالعه حاضر در راستای مطالعات کنونی است. یعنی بازیافت باتری، اثرگذاری بسیار بالایی بر کاهش آثار زیست‌محیطی آن دارد. در مطالعه‌ای

(Sullivan *et al.*, 2011). در گزارشی توسط EPA نیز ارزیابی چرخه حیات مواد نانولوله‌های تک‌دیواره به‌منزله آند در باتری‌های لیتیوم یونی بررسی شد، که براساس نتایج این گزارش، انرژی مورد نیاز برای سنتز آند نانولوله‌های تک‌دیواره که توسط روش تبخیر لیزری در آزمایشگاه سنتز شد، به‌طور قابل توجهی بیشتر از انرژی مورد نیاز برای تولید آندهای تجاری گرافیت است، به‌طوری‌که این اثر بر فواید بالقوه استفاده از این ماده در مرحله استفاده از باتری چیره می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اگر مصرف الکتریسیته برای سنتز این نانوماده تا حدود ۱۱ کیلووات ساعت به‌ازای هر کیلووات ساعت ظرفیت تولیدی آن کاهش یابد، آن‌گاه اغلب آثار زیست‌محیطی استفاده از این نانوماده به‌عنوان آند باتری قابل مقایسه با استفاده از آندهای گرافیت خواهد بود (U.S. EPA, 2013).

بنابراین، از نتایج مطالعه حاضر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای افزایش میزان ظرفیت ذخیره و تولید انرژی در واحد جرم باتری، باید موادی استفاده شوند که بتوانند هنگام داشتن شدت انرژی بالاتر، آثار زیست‌محیطی کمتری ایجاد کنند. یکی از گزینه‌های مهم کاهش دادن آثار زیست‌محیطی آن‌ها باز یافت آن‌هاست. بنابراین، می‌توان با تدوین سیاست‌هایی برای تولید و مصرف باتری‌ها، در راستای کاهش هزینه‌های تولید، حفظ محیط زیست و استفاده کمتر از منابع معدنی گام برداشت.

گزارش دادند که باتری‌های نیکل-کادمیوم با وجود شدت انرژی بیشتر، آثار زیست‌محیطی بیشتری نسبت به باتری‌های اسید-سربی دارند. در مطالعه Rydh (1999) نیز آثار زیست‌محیطی باتری‌های وانادیوم و اسید-سربی برای استفاده در ذخایر انرژی ثابت^۱ توسط رویکرد ارزیابی چرخه حیات بررسی شد. اثر زیست‌محیطی محاسبه‌شده برای باتری وانادیوم از باتری اسید-سربی کمتر بود. در گزارشی توسط Li و همکارانش (2014) نیز ارزیابی چرخه حیات آندهای نانوسیم‌های سیلیکون به‌منزله مواد فعال آند برای باتری‌های لیتیوم یونی برای کاربرد در خودروهای الکتریکی بررسی شد. این پژوهشگران آثار چرخه حیات باتری‌های با آندهای سیلیکون را به‌رغم داشتن ظرفیت بالاتر نسبت به آندهای گرافیت، بیشتر گزارش دادند که روش سنتز مواد را عامل مهم تعیین‌کننده در آثار زیست‌محیطی دانستند. در مطالعه دیگر، ارزیابی زیست‌محیطی مقایسه‌ای بین باتری‌های لیتیوم یونی با آند گرافیت و کاتد LiFePO_4 با استفاده از حلال‌های آب و NMP صورت گرفت (Zackrisson *et al.*, 2010). در مطالعه انجام‌شده توسط این گروه از پژوهشگران، مشخص شد که استفاده از آب به جای حلال NMP می‌تواند تا حد زیادی آثار زیست‌محیطی باتری‌های لیتیوم یونی را کاهش دهد. نقش باز یافت در کاهش آثار زیست‌محیطی باتری‌های لیتیوم یونی، نیکل-هیدرید فلزی و اسید-سربی در پژوهشی توسط Sullivan و همکارانش بررسی و مطالعه شد

REFERENCES

1. Bossche P.V., Vergels F., Mierlo J.V., Matheys J. and Autenboer W.V. 2006. SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, 162:913-919.
2. Boustead, I., Chaffee, C., Dove, W. T. and Yaros, B. R. 2000. Eco-Indices: What can they tell us? Boustead Consulting. 53 p.
3. Bratt, C., Hallstedt, S., Robert, K. H., Broman, G. and Oldmark, J. 2011. Assessment of eco-labelling criteria development from a strategic sustainability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 19:1631-1638.
4. Carl, J. R. 1999. Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 80:21-29.
5. Ciroth A. 2012. Software for life cycle assessment. In Curran, M. A. (Ed.), Life

- cycle assessment handbook-A guide for environmentally sustainable products. *Scrivener and John Wiley & Sons*, 143-157.
6. Gachot, G., Grugeon, S., Armand, M., Pilard, S., Guenot, P., Tarascon, J.-M. and Laruelle, S. 2008. Deciphering the multi-step degradation mechanisms of carbonate-based electrolyte in Li batteries. *Journal of Power Sources*, 178:409-421.
 7. Goedkoop, M., Effting, S. and Collingo, M. 2000. The Eco-Indicator'99-A damage oriented method for life cycle impact assessment-manual for designers, vol. 34, PRé Consultants BV, Amersfoort, Netherlands. 22p.
 8. Goedkoop M., Schryver A.D., Oele M., Durksz S. and Roest D.d. 2010. Introduction to LCA with SimaPro7. PRé Consultants. 86p.
 9. GREET2, 2013. <https://greet.es.anl.gov/greet/>, accessed on 30/5/2014.
 10. Huijbregts, M. A., Schöpp, W., Verkuijlen, E., Heijungs, R. and Reijnders, L. 2000. Spatially explicit characterization of acidifying and eutrophying air pollution in life-cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 4:75-92.
 11. IPCC, 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Intergovernmental panel on climate change.
 12. ISO 14040, 2006. Environmental management- Life cycle assessment- Principles and framework. 22p.
 13. ISO 14044, 2006. Environmental management- Life cycle assessment- Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland.
 14. Kargari N. and Mastoori R. 2010. Comparing the dispersion of greenhouse gases from different electricity power plants using LCA. *Iranian Journal of Energy*, 13:67-78. (In Persian).
 15. Khodi M. and Mousavi S.M.J. 2009. Life cycle assessment of power generation technology using GHG emissions reduction approach. 7th National Energy Congress. Iran, December. (In Persian).
 16. Laruelle, S., Grugeon, S., Poizot, P., Dolle, M., Dupont, L. and Tarascon, J.-M. 2002. On the Origin of the Extra Electrochemical Capacity Displayed by MO/Li Cells at Low Potential. *Journal of The Electrochemical Society*, 149:A627-A634.
 17. Li B., Gao X., Li J. and Yuan C. 2014. Life cycle environmental impact of high-capacity lithium ion battery with silicon nanowires anode for electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 48:3047-3055.
 18. Linden, D. and Reddy, T. B. 2001. Handbook of batteries, Third edition. McGraw-Hill. 1453 p.
 19. Longo, S., Antonucci, V. and Cellura, M. Life cycle assessment of storage systems: The case study of a sodium/nickel chloride battery. available online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.004> (accessed on 10 October 2013).
 20. Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R. and Stromman, A. H. 2011. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 45:4548-4554.
 21. Matheys, J., Timmermans, J. M., Mierlo, J. V., Mayer, S. and Den Bossche, P. V. 2009. Comparison of the environmental impact of five electric vehicle battery technologies using LCA. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1:318-329.
 22. Netz, A., Huggins, R. A. and Weppner, W. 2003. The formation and properties of amorphous silicon as negative electrode reactant in lithium systems. *Journal of Power Sources*, 119-121:95-100.
 23. Peng, C., Chen, B., Qin, Y., Yang, S., Li, C., Zuo, Y., Liu, S. and Yang, J. 2012. Facile ultrasonic synthesis of CoO quantum dot/graphene nanosheet composites with high lithium storage capacity. *Journal of ACS Nano*, 6:1074-1081.
 24. Poizot, P., Laruelle, S., Grugeon, S., Dupont, L. and Tarascon, J.M. 2000. Nanosized transition metal oxides as negative electrode materials for lithium-ion batteries. *Nature*, 407:496-499.
 25. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P. and Pennington, D. W. 2004. Life cycle assessment, Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and

- applications. Review. *Environment International*, 30:701-720.
26. Rydh C.J. 1999. Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 80:21-29.
27. Saeedi M., Karbassi A.R., Sohrab T. and Samadi R. 2006. Power plants' environmental management. Iran Energy Efficiency Organization, Ministry of Energy, Tehran, Iran. (In Persian).
28. Sullivan J.L., Gaines L. and Burnham A. 2011. Role of recycling in the life cycle of batteries. In: TMS 2011-140th Annual meeting and exhibition, San Diego, CA, 2011. TMS 2011-140th Annual Meeting and Exhibition. pp 25-32.
29. Taoussanidis, N. 2006. Life cycle assessment of combined solar system in proceedings of the 4th WSEAS international conference on heat transfer, Thermal engineering and environment, Elounda, Greece, 21-23 August.
30. Tarascon J.M. and Armand M. 2001. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414:359-367.
31. Torkian A., Hakim Javadi M. Alamal Hoda A.A. and Norri M.K., 2001, LCA approach in environmental management of the wastes of rechargeable Ni-Cd batteries, Proceeding of the first national conference of batteries (p.51), 6-7 Nov. 2001, University of Science and Technology, Tehran, Iran.
32. U.S. EPA, 2013. Application of LCA to nanoscale technology: Li-ion batteries for electric vehicles. Design for the environment program EPA's office of pollution prevention and toxics, National risk management research laboratory EPA's office of research and development. 120p.
33. Vatankhah K.R., Abedi M. and Mozaffari, S.A. 2001. Recovery of Acid-Lead Battery. *The 1st National Iranian Seminar of Battery*, 4-5 November, Tehran, Iran. (In Persian).
34. Yu, Y., Chen, B., Huang, K., Wang, X. and Wang, D. 2014. Environmental impact assessment and end-of-life treatment policy analysis for li-ion batteries and Ni-MH batteries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11:3185-3198.
35. Zackrisson, M., Avellan, L. and Orlenius, J. 2010 Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles-Critical issues. *Journal of Cleaner Production* 18:1519-1529.
36. Zhaolin, L. and Siok, W. T. 2012. Direct growth Fe₂O₃ nanorods on carbon fibers as anode materials for lithium-ion batteries. *Materials Letters*, 72:74-77.